

Effect of Modification of Sugarcane Bagasse and Date Palm Biochar by Hydrogen Peroxide on some of their Physicochemical Properties

Milad Biria¹, Habibalah Nadian Qomsheh ², Hossein Motamedi ³, Bijan Khalili Moghadam⁴, Nafiseh Rangzan^{5*}

(Received: March, 2024 Accepted: January, 2025)

Abstract

By modifying the physical and chemical properties of biochar, its efficiency in agriculture can be improved. To investigate the effects of modifying biochar with hydrogen peroxide on some of its physical and chemical properties, an experiment was conducted in a completely randomized design with factorial arrangement in three replicates. The experimental factors included sugarcane bagasse and date palm biochar modified with hydrogen peroxide and unmodified. The results showed that the modification of biochar increased cation exchange capacity, water holding capacity, functional groups (containing oxygen), moisture percentage, oxygen percentage, hydrogen percentage, decreased total nutrient concentration, total nitrogen percentage, total sulfur percentage, ash percentage, EC value, pH, carbon stability percentage (fixed carbon), specific surface area, volatile matter and carbon percentage, increased atomic ratio (oxygen to carbon, nitrogen to carbon in the palm biochar treatment and hydrogen to carbon), decreased bulk density in all treatments and elemental nitrogen to carbon ratio in the modified sugarcane bagasse biochar treatment. Electron microscope images also showed that the modification improved the quality of the biochar in terms of pores and porosity, with the modified sugarcane bagasse biochar showing the best results among the treatments. The highest improvement in characteristics was related to the modified sugarcane bagasse biochar treatment, which is recommended as the best treatment. Considering the results, it can be concluded that biochar modification with hydrogen peroxide improves the quality of biochar and provides the ability to better influence existing processes in the environment and agriculture as well as soil and environmental pollution management. Basically, this study provides an insight into the preparation of biochar for bioremediation processes.

Key words: Chemical Modification, Sugarcane Bagasse, Biochar, Hydrogen Peroxide, Date Palm.

Biria M., Nadian Qomsheh H., Motamedi H., Khalili Moghadam, B. and Rangzan N. 2025. Effect of modification of sugarcane bagasse and date palm biochar by hydrogen peroxide on some of their physicochemical properties. *Applied Soil Research*, 13(2): 17-37.

1 -Ph.D. Student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Agriculture Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran.

2 - Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Agriculture Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

3 - Professor, Department of Biology, Faculty of Science and Biorefinery Research Center, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

4- Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Agriculture Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

5- Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Agriculture Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

*Corresponding Author Email: rangzan@asnrukh.ac.ir

تأثیر اصلاح با پراکسید هیدروژن بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زغال‌زیستی باگاس نیشکر و نخل خرما

میلاد بی‌ریا^۱، حبیب‌اله نادیان قمشه^۲، حسین معتمدی^۳، بیژن خلیلی‌مقدم^۴، نفیسه رنگ‌زن^۵*

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴)

چکیده

با اصلاح ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زغال‌زیستی می‌توان کارایی آن را در کشاورزی بهبود بخشید. به منظور بررسی تأثیر اصلاح زغال‌زیستی با پراکسید هیدروژن بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل در سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایشی شامل زغال‌زیستی باگاس نیشکر و نخل خرما اصلاح‌شده با پراکسید هیدروژن و اصلاح‌نشده بودند. نتایج نشان داد که اصلاح زغال‌زیستی سبب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، ظرفیت نگهداشت آب، گروه‌های عاملی (دارای اکسیژن)، درصد رطوبت، درصد اکسیژن، درصد هیدروژن، کاهش غلظت کل عناصر غذایی مورد بررسی، درصد نیتروژن کل، درصد گوگرد کل، درصد خاکستر، مقدار pH، EC، درصد پایداری کربن (کربن تثبیت‌شده)، سطح ویژه، مواد فرار و درصد کربن، افزایش نسبت‌های اتمی مورد بررسی (اکسیژن به کربن، نیتروژن به کربن در تیمار زغال‌زیستی نخل خرما و هیدروژن به کربن، کاهش چگالی ظاهری در تمام تیمارها و نسبت عنصری نیتروژن به کربن در تیمار زغال‌زیستی باگاس نیشکر اصلاح‌شده را به دنبال داشت. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی هم نشان داد که اصلاح سبب بهبود کیفیت زغال‌های زیستی از نظر منافذ و تخلخل شده است که زغال‌زیستی باگاس نیشکر اصلاح‌شده بهترین نتایج را در بین تیمارها داشت. بیش‌ترین مقدار بهبود ویژگی‌ها مربوط به تیمار زغال‌زیستی باگاس نیشکر اصلاح‌شده بود که این تیمار به‌عنوان بهترین تیمار پیشنهاد می‌گردد. با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت که اصلاح زغال‌زیستی با پراکسید هیدروژن سبب بهبود کیفیت زغال‌زیستی شده و توانایی تأثیرگذاری بهتری را بر فرایندهای موجود در محیط‌زیست و کشاورزی و همچنین خاک و بحث مدیریت آلودگی زیست‌محیطی توسط آن فراهم می‌سازد. اساساً این مطالعه بینشی در مورد آماده‌سازی زغال‌های زیستی جهت فرایندهای زیست‌پالایی ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: اصلاح شیمیایی، باگاس نیشکر، زغال‌زیستی، پراکسید هیدروژن، نخل خرما

بی‌ریا م.، نادیان قمشه ح.، معتمدی ح.، خلیلی‌مقدم ب. و رنگ‌زن نفیسه. ۱۴۰۴. تأثیر اصلاح با پراکسید هیدروژن بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زغال‌زیستی باگاس نیشکر و نخل خرما. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۳، شماره ۲. صفحه: ۳۷-۱۷.

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران
- ۲- استاد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران
- ۳- استاد، گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، و مرکز تحقیقات پالایشگاه زیستی دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
- ۴- دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران
- ۵- دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران

* پست الکترونیک: rangzan@asnrukh.ac.ir

مقدمه

در ایران سالانه حدود ۱۷۰ میلیون تن پسماند کشاورزی تولید می‌شود (سازمان حفاظت محیط زیست، ۲۰۱۸). به دلیل مدیریت نامناسب، بخش عظیمی از آن‌ها سوزانده شده و یا بدون استفاده باقی می‌ماند. در استان خوزستان که یکی از قطب‌های مهم کشاورزی در ایران می‌باشد، تولید پسماند از محصولات کشاورزی (مانند نخل و نیشکر و غیره) حدود ۶ میلیون تن در سال برآورد می‌شود (Fao., 2015). یکی از راهکارهای مدیریت بقایای گیاهی و ضایعات کشاورزی، فرآوری و تبدیل آن‌ها زغال‌زیستی^۱ و استفاده بهینه از آن‌ها می‌باشد.

در سال‌های اخیر توجه به زغال‌زیستی و توانایی‌های آن به عنوان یک اصلاح‌کننده آلی خاک و مؤثر در ترسیب کربن و بهبود ویژگی‌های مختلف خاک مورد توجه قرار گرفته است. زغال‌زیستی یک محصول جامد می‌باشد که در اثر فرآیند گرماکافت زیست‌توده در شرایط حداقل اکسیژن و یا بدون حضور اکسیژن همراه با روغن زیستی^۲ و گازهای زیستی تشکیل می‌گردد (Elangger et al., 2015؛ 2013؛ Lehmann et al., 2015). بیش‌تر نتایج پژوهش‌ها نشان داده است که ظرفیت تبادل کاتیونی و طول عمر زغال‌زیستی در خاک به دلیل محتوای اکسیژن حفظ شده آن طی فرایند گرماکافت می‌باشد (Spokas et al., 2010). علاوه بر این نسبت اکسیژن به کربن (O/C) زغال‌زیستی با ظرفیت تبادل کاتیونی آن همبستگی دارد (Li et al., 2010). در سال‌های اخیر زغال‌زیستی یکی از محبوب‌ترین جاذب‌هایی است که برای حذف آلاینده‌ها استفاده شده است (Yu et al., 2019).

مشابه با کربن فعال فعالیت‌هایی جهت افزایش کارایی و فعال‌شدن زغال‌زیستی برای افزایش جذب فلزات سنگین و ظرفیت جذب آلاینده‌ها انجام شده است (Beesly et al., 2011). این روش‌ها شامل استفاده از اسیدها و بازهای قوی مانند فسفریک اسید و هیدروکسید پتاسیم است (Uchimiya et al., 2011). با این حال بسیاری از این

فرایندها در مقیاس بزرگ بسیار گران‌قیمت بوده و تولید محصولات جانبی مضر می‌نمایند. مطالعات (Xue et al., 2012) نشان داد که هیدروچار اصلاح‌شده با پراکسید هیدروژن ظرفیت جذب بالاتری را در رابطه با جذب فلزات سنگین از آب داراست. پراکسید هیدروژن یک اکسیدکننده قوی بوده که نسبتاً ارزان و در دسترس می‌باشد. استفاده از پراکسید هیدروژن به عنوان یک روش کارآمد در بهبود خواص زغال‌زیستی می‌تواند مطرح باشد. پس از کاربرد پراکسید هیدروژن در زغال‌زیستی، بعید است که در زغال‌زیستی باقی مانده و به صورت پسماند نامطلوب منتشر گردد؛ بلکه می‌تواند به محصولات تمیز مانند آب و اکسیژن تبدیل شوند. بنابراین به یک عنوان یک محصول اقتصادی و دوستدار محیط‌زیست قابلیت توصیه را دارد. زغال‌های زیستی با توجه به سطح ویژه بالا، ظرفیت تبادل کاتیونی و عناصر غذایی در دسترس مناسب، ظرفیت نگهداشت آب خوب و چگالی ظاهری پائین گزینه مناسبی جهت بهبود کیفیت خاک و رشد محصولات کشاورزی می‌باشد. نتایج مطالعات نشان داده است اصلاح زغال‌های زیستی سبب بهبود این ویژگی‌ها می‌گردد (Zafeer & Khajavi et al., 2023؛ Bushra & Remya, 2024؛ Meneze, 2024). توجه به حجم بالای تولید پسماندهای کشاورزی در استان خوزستان به ویژه باگاس نیشکر و همچنین محصولات مربوط به نخل خرما، استفاده از روشی کارآمد جهت مدیریت این پسماندهای کشاورزی ضروری می‌باشد. نظر به این موضوع که تاکنون مطالعات چندانی در خصوص تأثیر اصلاح زغال‌های زیستی با استفاده از پراکسید هیدروژن بر روی این پسماندها انجام نشده است، این مطالعه با هدف بررسی تأثیر اصلاح زغال‌زیستی توسط پراکسید هیدروژن بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زغال‌زیستی باگاس نیشکر و ضایعات نخل خرما و مقایسه آن‌ها و انتخاب بهترین تیمار انجام شد.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده‌سازی زغال‌زیستی

در این مطالعه، زغال‌زیستی تولیدشده از زیتوده‌های باگاس نیشکر و نخل خرما از طریق گرماکافت در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس با هدف تولید محصولی جهت پالایش خاک‌های آلوده ساخته شد. و سپس با غلظت H_2O_2 ده درصد (W/W) تیمار شد. زیتوده باگاس نیشکر و نخل خرما برای تولید زغال‌زیستی به‌دلیل فراوانی و در دسترس بودن محلی (دسترس‌ی ساده آن‌ها در سطح استان خوزستان) آن‌ها استفاده شد. برای تهیه زغال‌زیستی از دو زیست‌توده باگاس نیشکر و ضایعات نخل خرما استفاده شد. زیست‌توده‌ی باگاس نیشکر از شرکت کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (ره) واقع در شمال اهواز و جنوب شوشتر در استان خوزستان و ضایعات نخل خرما از دانشگاه شهیدچمران اهواز جمع‌آوری شدند. زیست‌توده‌های جمع‌آوری‌شده ابتدا هواخشک شدند و پس از آسیاب کردن، از الک ۲ میلی-متری عبور داده شدند. و در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک گردیدند. زیست‌توده‌ها در کوره الکتریکی در شرایط بدون اکسیژن در دمای ۴۰۰ درجه‌ی سلسیوس با نرخ افزایش ۵ درجه در دقیقه به‌مدت ۳ ساعت در دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز گرماکافت آهسته شدند (Park et al., 2015; Rajkovich et al., 2011).

اصلاح زغال‌زیستی

زغال‌های زیستی تولیدشده با محلول ۳۰ درصد H_2O_2 در دمای اتاق به‌مدت ۲۴ ساعت بدون هم زدن قرار گرفت و پس از آن زغال‌های زیستی در دمای ۸۰ درجه سلسیوس به‌مدت ۲۴ ساعت خشک شدند و سپس با آب مقطر تا رسیدن pH به ۷ آبشویی شده و در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به‌مدت ۲۴ ساعت خشک خواهند شد (Usman et al., 2015; Takaya et al., 2016). پس از تهیه‌ی زغال‌های زیستی، ویژگی‌های آن‌ها به‌شرح زیر در سه تکرار اندازه‌گیری شد.

بررسی ویژگی‌های زغال‌زیستی

بررسی درصد عملکرد، مقدار رطوبت، مقدار مواد فرار، درصد خاکستر زغال‌زیستی، درصد کربن تثبیت‌شده درصد عملکرد زغال‌زیستی (Y) بر حسب گرم بر اساس رابطه ۱ محاسبه شد (Singh et al., 2017).

$$Y = \frac{W_B}{W_{RB}} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه؛ W_B و W_{RB} به‌ترتیب عملکرد زغال‌زیستی (درصد)، وزن زغال‌زیستی (گرم)، وزن آون خشک شده زیست‌توده اولیه در دمای ۱۰۵ °C (گرم) است. برای اندازه‌گیری درصد خاکستر زغال‌زیستی، ۵ گرم از هر نمونه آون-خشک شده، داخل بوته چینی قرار داده و به‌مدت ۶ ساعت در کوره الکتریکی در دمای ۷۵۰ درجه سلسیوس در شرایط اکسیژن کافی قرار داده شد. سپس درصد خاکستر از رابطه ۲ برآورد شد (Singh et al., 2017).

$$A = \frac{W_A}{W_B} \times 100 \quad (2)$$

در این رابطه؛ W_A و W_B به‌ترتیب عملکرد زغال‌زیستی (درصد)، وزن خاکستر (گرم) و وزن زغال‌زیستی آون‌خشک شده می‌باشند. مقدار رطوبت^۱ در واقع مقدار آب موجود در نمونه است. مقدار رطوبت نمونه بر اساس روش ASTM D2974 تعیین گردید. مقدار مواد فرار^۲، گازها و بخارات ناشی از نمونه زیست‌توده طی فرایندهای حرارتی است که بر اساس روش ASTM D2974 اندازه‌گیری شد. مقدار کربن تثبیت‌شده^۳ از طریق رابطه ۳ و به وسیله‌ی کم کردن مجموع درصد مقدار رطوبت، درصد مواد فرار و درصد خاکستر از عدد ۱۰۰ محاسبه گردید. عدد بدست‌آمده مقدار کربن تثبیت‌شده حاضر در نمونه بر حسب درصد است.

$$(3) \quad \text{درصد خاکستر} + \text{درصد مواد فرار} + \text{درصد رطوبت} - 100 = \text{درصد کربن تثبیت‌شده}$$

بررسی ویژگی‌های شیمیایی زغال‌زیستی

بررسی چگالی ظاهری زغال زیستی

چگالی ظاهری در زغال زیستی با استفاده از روش پیکنومتری انجام شد (Kaghzchi & Madadi, 2004; Yeghaneh, 2004).

بررسی مورفولوژی زغال زیستی

مورفولوژی سطحی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) آزمایشگاه مرکزی دانشگاه لرستان، سطح ویژه با استفاده از دستگاه Nano Sord بررسی شد (Chintella et al., 2013).

طرح آماری

به منظور مقایسه ویژگی‌های زغال‌های زیستی مورد بررسی، تجزیه واریانس داده‌ها بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با تیمارهای دو نوع زیست‌توده (شامل دو نوع زیست‌توده باگاس نیشکر و ضایعات نخل اصلاح نشده و اصلاح شده با پراکسید هیدروژن و در سه تکرار و در کل ۱۲ نمونه آزمایشی) با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها نیز با استفاده از آزمون توکی و در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

مقایسه زغال‌های زیستی اصلاح نشده و اصلاح شده

باگاس نیشکر و نخل خرما از طریق تصاویر میکروسکوپ

الکترون روبشی

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، سطوح زغال زیستی اصلاح نشده با ساختارهای دانه‌ای نسبتاً ناهموار بود، در حالی که سطوح زغال زیستی اصلاح شده با پراکسید هیدروژن دارای ساختار ظریف و آمورف بود (شکل ۱). همچنین خلل و فرج نیز بیش‌تر شده است که این مشاهدات با نتایج (Li et al., 2014) نیز مشابهت دارد. بهترین ویژگی‌ها (ساختار آمورف و خلل و فرج بالاتر) در تیمار زغال زیستی باگاس نیشکر اصلاح شده مشاهده شد. نتایج میکروسکوپ الکترون روبشی نشان داد که زغال زیستی باگاس نیشکر اصلاح شده ساختاری ناهمگن و غنی از شکاف‌ها و کانال‌ها دارد. که با نتایج (Shaaban et al., 2013) و (Suárez-Hernández et al., 2017) در یک راستا قرار دارد. نتایج سطح ویژه زغال‌های زیستی نشان داد

pH و EC هر یک از نمونه‌های زغال زیستی در سوسپانسیون ۱ به ۱۰ (زغال زیستی به آب مقطر) پس از یک ساعت تکان دادن با دستگاه pH متر و دستگاه EC اندازه‌گیری شد (Beheshti & Alikhanu., 2016). تعیین گروه‌های عاملی زغال‌های زیستی با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی مادون قرمز دانشکده علوم دانشگاه شهید چمران اهواز، ظرفیت تبادل کاتیونی با استفاده از روش جایگزینی NaNO_3 به جای HCl یا KCl انجام شد (Chintella et al., 2013). برای اندازه‌گیری مقادیر فسفر، سدیم و پتاسیم کل بقایای اولیه و زغال‌های زیستی تولید شده، نمونه‌ها ابتدا در دمای ۵۵۰ درجه‌ی سلسیوس خاکستر شده و عصاره‌گیری از خاکستر با کلریدریک اسید ۲ مولار انجام شد. سپس مقدار فسفر کل در محلول با استفاده از روش رنگ‌سنجی آسکوربیک اسید - آمونیوم - مولیبدات در طول موج ۸۸۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری گردید. (Al-Wabel et al., 2013). عناصر سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، روی، آهن، نیکل، سرب و کادمیوم توسط دستگاه طیف‌سنجی پلاسمایی جفت شده القایی (ICP) آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شهید چمران اهواز (مدل Optima Model 8300 Manufactured by PerkinElmer) قرائت گردید. همچنین مقدار آنیون‌های زغال زیستی شامل کلر، سولفات، بیکربنات و کربنات در زغال زیستی، مطابق روش‌های استاندارد اندازه‌گیری که برای نمونه‌های خاک استفاده می‌گردد، با استفاده از نمونه هضم شده زغال زیستی انجام شد (غلظت کلر و بیکربنات توسط تیتراسیون و غلظت سولفات نیز با حل سولفات کلسیم در استون و سنجیده و گزارش شد) (Rajkovich et al., 2011).

بررسی ویژگی‌های فیزیکی زغال زیستی

بررسی ظرفیت نگهداری آب زغال زیستی

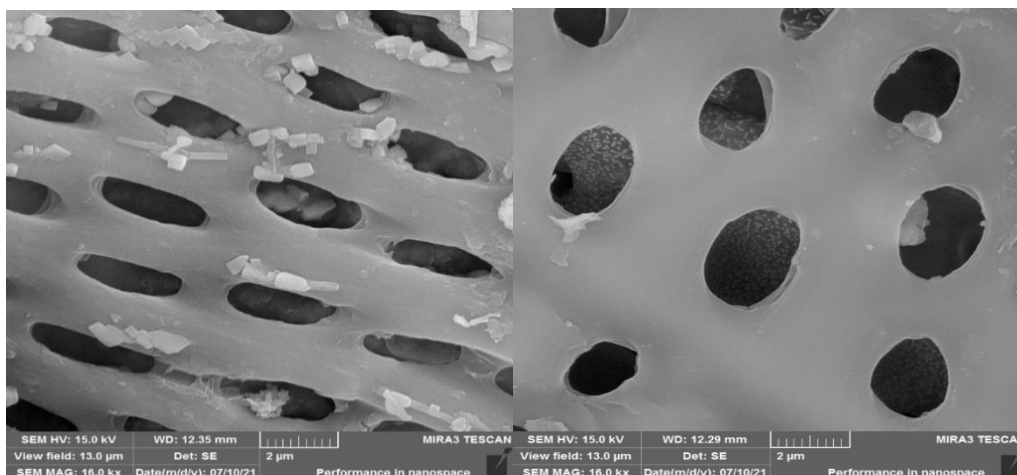
ظرفیت نگهداری آب در زغال‌های زیستی طبق رابطه ۴ بدست آمد :

$$(4) \quad \text{ظرفیت نگهداری آب (g)} = \text{آب نگهداری شده (g)} / \text{وزن زغال زیستی (g)} \times 100$$

(Song et al., 2012).

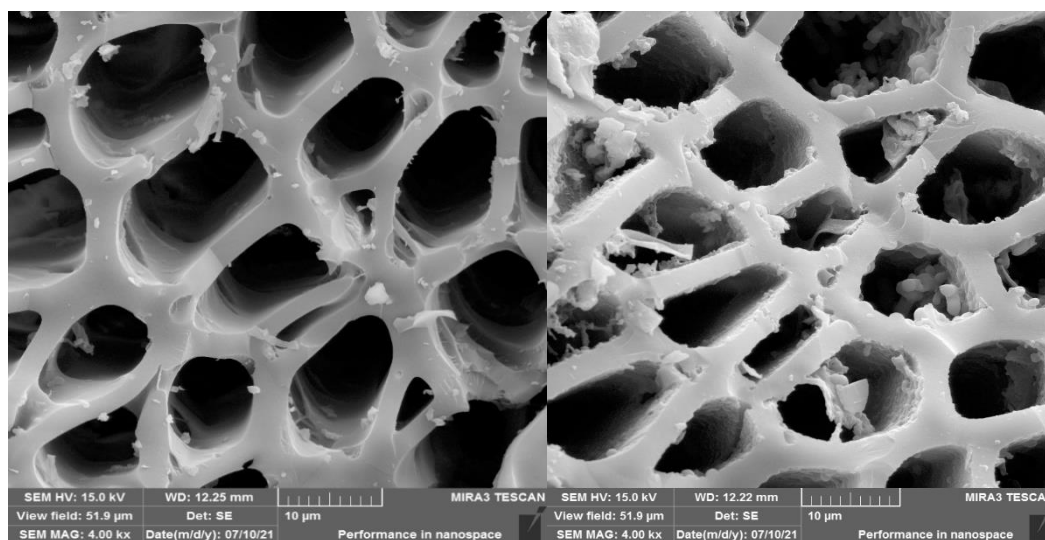
زیستی توسط پراکسید هیدروژن سبب کاهش سطح ویژه می‌شود. این مسئله احتمالاً به دلیل اشغال بخشی از سطح زغال زیستی توسط پراکسید هیدروژن باشد.

که زغال زیستی باگاس نیشکر اصلاح شده بالاترین مقدار و زغال زیستی نخل خرما اصلاح نشده کمترین مقدار را دارا بود (جدول ۶). نتایج به خوبی با مشاهدات مربوط به تغییرات سطح ویژه مطابقت داشتند. زیرا اصلاح زغال‌های



ب- زغال زیستی باگاس نیشکر اصلاح نشده
b- Modified sugarcane bagasse biochar

الف- زغال زیستی اصلاح شده باگاس نیشکر
A- Raw sugarcane bagasse biochar



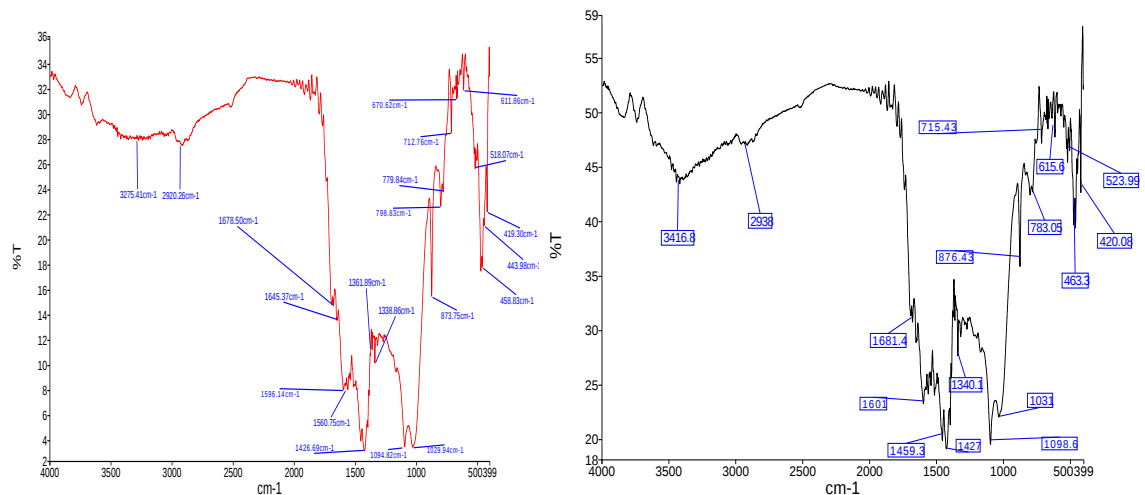
د- زغال زیستی نخل اصلاح نشده
d- Modified palm biochar

ج- زغال زیستی اصلاح شده نخل خرما
C- Raw date palm biochar

شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی زغال‌های زیستی مورد مطالعه
Figure 1- Scanning electron microscope images of the studied biochars

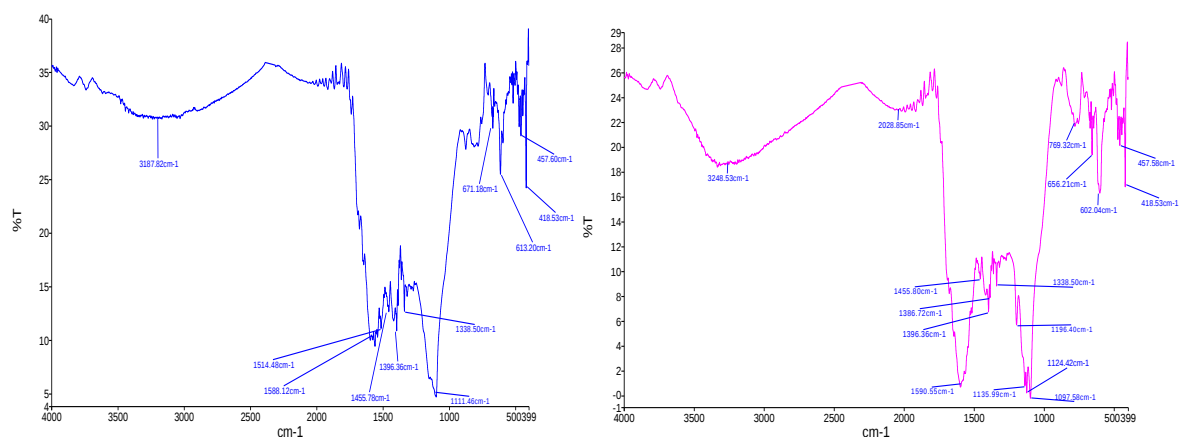
طیف سنجی مادون قرمز تیمارها

در شکل ۲ (الف تا د) طیف سنجی مادون قرمز زغال‌های زیستی اصلاح شده باگاس نیشکر، نیشکر اصلاح نشده، نخل اصلاح شده و اصلاح نشده آورده شده است.



الف - طیف سنجی مادون قرمز زغال زیستی باگاس نیشکر اصلاح شده
ب - طیف سنجی مادون قرمز زغال زیستی باگاس نیشکر اصلاح نشده

B- Infrared spectroscopy of raw sugarcane bagasse biochar A- Infrared spectroscopy of modified sugarcane bagasse biochar



ج - طیف سنجی مادون قرمز زغال زیستی نخل اصلاح نشده
د - طیف سنجی مادون قرمز زغال زیستی نخل اصلاح شده

C- Infrared spectroscopy of raw date palm biochar D- Infrared spectroscopy of modified date palm biochar

شکل ۲- طیف سنجی مادون قرمز زغال‌های زیستی مورد استفاده در پژوهش

Figure 2. Infrared spectroscopy of the biochars used in the study

حاوی اکسیژن در آن می‌باشد. این مسئله به احتمال زیاد به علت افزوده شدن اکسیژن و هیدروژن در اثر اصلاح زغال‌های زیستی اصلاح نشده اولیه می‌باشد که در نتیجه منجر به افزایش گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن شده است. این موضوع باعث بهبود وضعیت جذب عناصر، حاصلخیزی و تثبیت آلاینده‌ها در زغال‌زیستی می‌گردد (Takaya et al., 2016). این نتایج با نتایج (Takaya et al., 2016) هم راستا می‌باشد. گروه‌های عاملی OH- و C=O روی سطوح زغال‌زیستی می‌توانند به عنوان دهنده π -الکترون کنند و برهم‌کنش‌های π - π را با آلاینده فراهم نمایند. (Chen et al., 2018; Luo et al., 2018). همچنین پیک‌ها در تیمارهای اصلاحی دارای قله‌های بلندتر و شارپ‌تری نسبت به تیمارهای اولیه می‌باشند که بیانگر افزایش مقدار (مقدار) گروه‌های عاملی می‌باشد. محتوای گروه‌های عاملی اسیدی و اکسیژن‌دار در زغال‌های زیستی اصلاح‌شده افزایش یافت. بهترین نتیجه را در بین تیمارها زغال‌زیستی باگاس نیشکر اصلاح‌شده توسط پراکسید هیدروژن شاهد داشت. اصلاح زغال‌زیستی با پراکسید هیدروژن منجر به بیش‌تر شدن گروه‌های عملی اسیدی مانند کربوکسیل می‌شود. گزارش‌های (Chen et al., 2008; Li et al., 2008; Tan et al., 2018) با دست‌آوردهای این پژوهش هم‌راستا بود.

تجزیه و تحلیل طیف‌سنجی مادون قرمز برای زغال‌های زیستی مورد مطالعه در محدوده $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ انجام شد. نتایج نشان داد که زغال‌های زیستی دارای گروه‌های عاملی متنوعی از جمله فنول (OH-) (در حدود cm^{-1} ۳۴۳۰)، گروه‌های زنجیره آلیفاتیک (CH_2) (در حدود cm^{-1} ۲۹۲۲)، کششی آروماتیک (C=C) (در حدود cm^{-1} ۱۶۲۰)، گروه‌های (C=O) (cm^{-1} ۱۵۸۰)، گروه (COO-) (در حدود cm^{-1} ۱۴۰۰) و گروه‌های (C-O) (در حدود cm^{-1} ۱۰۸۰) بودند (Luo et al., 2018; Wang et al., 2013; Dong et al., 2019 d; Chen et al., 2018). باید به نوار CO_2 اشباع اختصاص یابد (Dong et al., 2017). نتایج طیف‌سنجی مادون قرمز نشان‌دهنده افزایش مقدار گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار در زغال‌های زیستی نسبت به تیمارهای اولیه می‌باشد. به عبارت بهتر از طریق مقایسه بین زغال‌های زیستی اصلاح نشده و اصلاح‌شده می‌توان مشاهده کرد که باندهای اختصاص‌شده به گروه‌های حاوی اکسیژن قوی‌تر بود. ظرفیت فعال‌سازی زغال‌زیستی با گروه‌های عاملی مرتبط است. اصلاح توسط پراکسید هیدروژن منجر به قوی‌تر شدن باندهای اختصاص‌داده شده به گروه‌های حاوی اکسیژن (C=O ، COO- و C-O) می‌شود (Sun et al., 2019). در رابطه با تیمارهای مورد بررسی، شدت پیک‌ها در زغال‌زیستی باگاس نیشکر اصلاح‌شده نسبت به سایر تیمارها بیش‌تر بوده است (شکل ۲). که نشان‌دهنده بالاتر بودن گروه‌های

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس درصد رطوبت، کربن تثبیت شده، درصد خاکستر، مواد فرار، درصد بازدهی، pH، EC، درصد کربن، درصد نیتروژن و درصد اکسیژن در تیمارها

Table 1. Results of variance analysis of moisture percentage, fixed carbon, ash percentage, volatile matter, yield percentage, pH, EC, carbon percentage, nitrogen percentage, and oxygen percentage in treatments

Source of variation	Degree of Freedom	(MS)									
		moisture percentage	fixed carbon	ash percentage	volatile matter	yield percentage	pH	EC	carbon percentage	nitrogen percentage	oxygen percentage
Biochar	1	85.066 ^{ns}	41.478 ^{ns}	50.020**	17.328*	57.203*	3.276*	0.37332**	8.450**	1.499**	2.56070**
Processing	1	309.169**	90.146*	38.520*	436.812**	4563.00**	2.970*	0.533**	292.349**	10.323**	664.838**
Biochar × Processing	1	8.789 ^{ns}	2.314 ^{ns}	0.440 ^{ns}	0.496 ^{ns}	57.203*	0.232	0.00008 ^{ns}	36.575**	8.721**	111.508**
Error	8	16.666	10.292	0.958	2.095	2.421	0.024	0.15	0.083	0.0000001	0.083

ns، * و ** به ترتیب نشان دهنده عدم معنی داری، معنی داری در سطح ۵ و ۱ درصد

ns, * and ** indicate non-significance, significance at 5 and 1 percent level, respectively

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس درصد هیدروژن، درصد گوگرد، O/C، C/N، H/C، پتاسیم، فسفر، کلسیم و منیزیم در تیمارها

Table 2. Results of variance analysis of hydrogen percentage, sulfur percentage, O/C, C/N, H/C, potassium, phosphorus, calcium, and magnesium in treatments

Source of variation	Degree of Freedom	(MS)								
		hydrogen percentage	sulfur percentage	O/C	C/N	H/C	potassium	phosphorus	calcium	magnesium
Biochar	1	34.578**	699.060**	0.088**	0.139**	0.028**	3285.751**	256961.333/**	693121.33**	102675.00**
Processing	1	14.586**	2.736**	0.304**	44.794**	32.298**	16354.083 ^{ns}	16576.333**	309123.00**	8216.333**
Biochar × Processing	1	1.449**	0.126**	0.055**	73.157**	0.544**	262552.083 ^{ns}	1045.333**	37632.00**	2133.333**
Error	8	0.0000001	0.000001	0.00008	0.011	0.001	220250.667	62.083	204.33	83.416

ns، * و ** به ترتیب نشان دهنده عدم معنی داری، معنی داری در سطح ۵ و ۱ درصد

ns, * and ** indicate non-significance, significance at 5 and 1 percent level, respectively

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس سدیم، آهن، روی، سولفات، کلر، بیکربنات، سطح ویژه، CEC، چگالی ظاهری و WHC در تیمارها

Table 3. Results of variance analysis of sodium, iron, zinc, sulfate, chlorine, bicarbonate, specific surface area, CEC, apparent density, and WHC in treatments

Source of variation	Degree of freedom	Means Square (MS)									
		sodium	iron	zinc	sulfate	chlorine	bicarbonate	surface area	CEC	Apparent density	WHC
Biochar	1	104346.750**	116230.083**	330.750**	9075.00**	1610.083**	227.940**	6792.520**	697.687**	0.180**	0.480**
Processing	1	19280.083**	88235.750**	234.083**	1825.333**	816.750**	10.267**	1887.520**	865.300**	0.019**	0.163**
Biochar × Processing	1	234.083*	11970.083**	36.750*	96.332 ^{ns}	44.083 ^{ns}	0.100 ^{ns}	500.520**	4.687*	0.003**	0.043**
Error	8	35.750	357.166	4.166	43.000	14.500	0.520	1.133	0.856	0.00008	0.002

ns, * و ** به ترتیب نشان دهنده عدم معنی داری، معنی داری در سطح ۵ و ۱ درصد

ns, * and ** indicate non-significance, significance at 5 and 1 percent level, respectively

جدول ۴- نتایج مقایسه میانگین درصد بازدهی، pH، درصد کربن، درصد نیتروژن، درصد اکسیژن، درصد هیدروژن، درصد گوگرد و O/C در تیمارها

Table 4. The comparison results of average efficiency percentage, pH, carbon percentage, nitrogen percentage, oxygen percentage, hydrogen percentage, sulfur percentage, and O/C in the treatments

Biochar Type	Processing	efficiency percentage (%)	pH	carbon percentage (%)	nitrogen percentage (%)	oxygen percentage (%)	hydrogen percentage (%)	sulfur percentage (%)	O/C
Sugarcane	Un Modified	43.46 a	7.550 c	55.464 a	2.30 a	15.25 c	7.94 b	5.18 c	0.274 c
Bagasse	Modified	-	6.27 d	45.404 d	1.92 b	29.423 a	10.392 a	1.531 d	0.648 a
Date Palm	Un Modified	34.63 b	8.31 a	50.011 b	1.59 c	12.786 d	6.69 d	18.09 a	0.257 d
	Modified	-	7.60 b	43.470 c	1.07 d	25.31 b	7.63 c	13.787 b	0.582 b

میانگین با حروف غیرمشابه دارای اختلاف معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد هستند (آزمون توکی)

Means with different letters have a significant difference at the 5% probability level (Tukey's test)

جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین C/N، H/C، فسفر، کلسیم، منیزیم، سدیم، آهن کل، پتاسیم کل و روی کل در تیمارها

Table 5. Comparison results of average C/N, H/C, phosphorus, calcium, magnesium, sodium, Total iron, Total potassium, and Total zinc in treatments

Biochar Type	Processing	C/N	H/C	Phosphorus (mg kg ⁻¹)	Calcium (mg kg ⁻¹)	Magnesium (mg kg ⁻¹)	Sodium (mg kg ⁻¹)	Total iron (mg kg ⁻¹)	Total potassium (mg kg ⁻¹)	Total zinc (mg kg ⁻¹)
Sugercane	UnModified	24.114 c	0.143 c	370.66 a	1529.39 a	351.66 a	289.66 a	1251.33 a	2225.67 a	43.00 a
Bagasse	Modified	23.647 cd	0.228 a	340.33 b	1478.00 b	297.66 b	186.77 b	1085.667 b	2147.33 b	38.333 b
Date	UnModified	31.453 b	0.133 d	92.66 c	927.67 c	181.33 c	109.66 c	782.33 c	967.00 c	31.666 c
Palm	Modified	40.426 a	0.175 b	83.66 d	856.00 d	128.00 d	67.66 d	621.00 d	884.33 d	22.333 d

میانگین با حروف غیرمشابه دارای اختلاف معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد هستند (آزمون توکی)

Means with different letters have a significant difference at the 5% probability level (Tukey's test)

جدول ۶- نتایج مقایسه میانگین سطح ویژه، CEC، چگالی ظاهری و WHC در تیمارها

Table 6. Comparison results of average specific surface, CEC, apparent density, and WHC in treatments

Biochar Type	Processing	average specific surface (m ² /g)	CEC (cmol kg ⁻¹)	apparent density (g cm ⁻³)	WHC (g g ⁻¹)
Sugercane	UnModified	162.40 a	59.80 b	0.160 c	1.46 b
Bagasse	Modified	134.42 b	78.03 a	0.114 d	1.813 a
Date	Unmodified	101.90 c	45.80 c	0.441 a	1.180 d
Palm	Modified	89.73 d	61.53 b	0.323 b	1.293 c

میانگین با حروف غیرمشابه دارای اختلاف معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد هستند (آزمون توکی)

Means with different letters have a significant difference at the 5% probability level (Tukey's test)

جدول ۷- نتایج مقایسه میانگین بیکربنات، سولفات، کلر، درصد رطوبت، درصد خاکستر، مواد فرار، EC و کربن تثبیت شده در تیمارها

Table 7. Comparison results of average bicarbonate, sulfate, chlorine, moisture percentage, ash percentage, volatile substances, EC, and fixed carbon in the treatments

Biochar Type	Processing	Bicarbonate (mg kg ⁻¹)	Sulfate (mg kg ⁻¹)	Chlorine (mg kg ⁻¹)	moisture percentage (%)	ash percentage (%)	volatile substances (%)	EC (ds m ⁻¹)	fixed carbon (%)
Sugercane	UnModified	16.53 b	135.33 d	44.00 b	13.39 c	13.866 a	30.303 a	9.55 a	42.441 c
Bagasse	Modified	14.53 a	128.33 c	40.33 a	24.25 a	11.33 b	25.559 c	9.38 b	38.861 d
Date Palm	UnModified	7.96 d	165.66 b	34.66 d	11.276 d	10.833 c	28.106 b	7.55 c	49.785 a
	Modified	5.63 c	154.00 a	26.33 c	21.861 b	8.733 d	22.746 d	7.15 d	46.66 b

میانگین با حروف غیرمشابه دارای اختلاف معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد هستند (آزمون توکی)

Means with different letters have a significant difference at the 5% probability level (Tukey's test)

ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی زغال‌های زیستی

مورد بررسی

نتایج جدول تجزیه‌ی واریانس داده‌ها نشان داد که نوع زیست‌توده‌ها و اصلاح آن‌ها تأثیر متفاوت و معنی‌داری بر درصد کربن، نیتروژن، اکسیژن، مقدار pH و EC، درصد بازدهی، رطوبت، کربن تثبیت‌شده، خاکستر و مقدار مواد فرار در سطح ۱ درصد داشت (جدول ۱). ولی اثرات متقابل آن‌ها تأثیر معنی‌داری را بر درصد رطوبت، کربن تثبیت‌شده و درصد خاکستر نشان نداد. ولی در سایر تیمارها، تفاوت معنی‌داری در سطح یک درصد حاصل شد.

نتایج نشان داد که نوع زیست‌توده‌ها و اصلاح زغال‌زیستی تأثیر متفاوت و معنی‌داری در سطح یک درصد بر درصد هیدروژن، مقادیر گوگرد، فسفر، کلسیم، منیزیم و نسبت-های C/N, O/C و H/C داشته است. ولی اثرات متقابل آن‌ها بر روی مقدار پتاسیم دارای تفاوت معنی‌داری نبوده است. در حالی که بر سایر پارامترها دارای تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد بود (جدول ۲).

نتایج جدول ۳ تجزیه‌ی واریانس داده‌ها نشان داد که نوع زیست‌توده‌ها و اصلاح آن‌ها تأثیر متفاوت و معنی‌داری بر مقدار عناصر سدیم، آهن، روی، سولفات، کلر، بی‌کربنات، مقدار سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی، چگالی ظاهری و مقدار ظرفیت نگهداشت داشته است. ولی اثرات متقابل آن‌ها تأثیر معنی‌داری بر مقدار آنیون‌ها (سولفات، کلر و بی‌کربنات) مشاهده نشد. در سایر صفات مورد بررسی، تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد مشاهده گردید.

نتایج مقایسات میانگین (جدول ۴) نشان داد که مقدار بیش‌ترین بازدهی مربوط به زغال‌زیستی نخل خرما (۴۳/۳۶ درصد) بود. این نتیجه احتمالاً به دلیل مقدارمحتوای بالاتر لیگنین آن نسبت به باگاس نیشکر بوده است که سبب شده مقدار بیش‌تر بازدهی آن نسبت به باگاس نیشکر بیش‌تر باشد. یکی از ویژگی‌های مهم زغال‌زیستی که قبل از بکار بردن آن بعنوان اصلاح‌کننده‌ی خاک مورد توجه قرار می‌گیرد pH آن می‌باشد؛ که به‌طور معنی‌داری با افزایش مقادیر عناصر قلیایی، مقدار آن نیز افزایش می‌یابد (Ahmad et al., 2012). pH یک ویژگی ضروری برای کاربرد زغال‌زیستی در محیط‌های مختلف می‌باشد. این پارامتر می‌تواند یک عامل تعیین‌کننده بر حذف آلاینده‌ها در اثر استفاده زغال‌زیستی در خاک باشد. بالاترین مقدارمقدار pH نیز

مربوط به زغال‌زیستی نخل اصلاح نشده با مقدار ۸/۳۱ می‌باشد. اصلاح زغال‌زیستی سبب کاهش این پارامتر در زغال‌های زیستی شد به‌طوری که کم‌ترین مقدارمقدار pH در زغال‌زیستی باگاس نیشکر اصلاح‌شده با مقدار ۶/۲۷ مشاهده شد. این نتیجه به دلیل ویژگی اسیدی ماده اصلاح‌کننده (پراکسید هیدروژن) می‌باشد؛ که کاهش این پارامتر را در زغال‌های زیستی اصلاح شده به وجود آورده است. اصلاح زغال‌زیستی توسط پراکسید هیدروژن باعث افزایش گروه‌های عاملی اسیدی و دارای اکسیژن بر روی سطوح زغال‌زیستی شد (شکل ۲). علت افزایش pH این است که در فرایند گرماکافت، گروه‌های عاملی مختلف نظیر کربوکسیل، هیدروکسیل و اسیدهای آلی با وزن مخصوص کم که خاصیت اسیدی دارند، تصعید و به بخار تبدیل می‌شوند. علاوه بر این با افزایش دما در حین گرماکافت مقداری خاکستر که خاصیت قلیایی دارد نیز تولید می‌شود. در نتیجه زغال‌زیستی باقی‌مانده pH قلیایی خواهد داشت (Ippolito et al., 2015).

تفاوت درصد کربن زغال‌زیستی حاصل از زیست‌توده‌های مختلف، مربوط به ویژگی‌های وراثتی آن‌ها می‌باشد که منجر به تولید دلیل این کاهش افزایش تجزیه خاکستر و در نتیجه کربن می‌باشد. بیش‌ترین مقدار کربن مربوط به تیمار زغال‌زیستی باگاس نیشکر اصلاح نشده (۵۵/۴۶۴ درصد) و کم‌ترین آن نیز از آن زغال‌زیستی نخل خرما اصلاح شده (۴۳/۴۷۰ درصد) بود. نتایج بدست‌آمده با نتایج (Xue et al., 2012) و (Sun et al., 2019) مطابقت داشت.

بیش‌ترین درصد نیتروژن مربوط به زغال‌زیستی باگاس نیشکر اصلاح نشده (۲/۳۰ درصد) و کم‌ترین آن نیز مربوط به تیمار زغال‌زیستی اصلاح شده نخل خرما (۱/۰۷ درصد) مشاهده شد. به‌طور کلی، اصلاح زغال‌های زیستی سبب کاهش درصد نیتروژن در آن‌ها شده است. این مسئله به دلیل خاصیت فرار بودن نیتروژن و تصاعد آن در هنگام اصلاح زغال‌زیستی توسط پراکسید هیدروژن می‌باشد. مقدار درصد نیتروژن در زیست‌توده‌های اولیه در مقایسه با زغال‌زیستی تولیدشده از آن زیست‌توده‌ها بسیار بیش‌تر بوده و در حین فرایند اصلاح به دلیل تجزیه پروتئین‌ها و فرار بودن نیتروژن آمونومی مقدار درصد نیتروژن کاهش پیدا می‌کند (Agrafioti et al., 2013; Quicker and Weber, 2018). اصلاح

زغال‌زیستی بر روی این پارامتر در زغال‌زیستی تغییرات عمده‌ای را به وجود آورد.

در رابطه با اکسیژن و هیدروژن، نتایج معکوسی مشاهده می‌شود به طوری که با اصلاح انجام شده درصد این عناصر در زغال‌های زیستی افزایش داشته است. دلیل این موضوع افزودن هیدروژن و اکسیژن در اثر اصلاح آن‌ها با پراکسید هیدروژن می‌باشد. بیش‌ترین درصد اکسیژن در تیمار زغال‌زیستی باگاس نیشکر اصلاح‌شده (۲۹/۴۲۳ درصد) بدست آمد. کم‌ترین مقدار آن نیز مربوط به زغال‌زیستی نخل خرما اصلاح نشده (۱۲/۷۸۶ درصد) بود. این نتیجه با یافته‌های مطالعات قبلی مطابقت دارد که بیان می‌کند اصلاح پراکسید هیدروژن می‌تواند سطوح کربن‌دار را اکسید کرده و گروه‌های حاوی اکسیژن به‌ویژه گروه‌های کربوکسیل را افزایش دهد (Song et al., 2010). علت تفاوت در اکسیژن زغال‌های زیستی اصلاح نشده و اصلاح‌شده به دلیل تفاوت در مقدار پایداری ترکیبات اکسیژن‌دار در زیست‌توده‌های مختلف باشد. گزارشهای (Zhao et al., 2018) نیز با نتایج فوق در یک راستا می‌باشند. در رابطه با عنصر هیدروژن بیش‌ترین درصد مربوط به زغال‌زیستی باگاس نیشکر اصلاح‌شده (۱۰/۳۹۲ درصد) و کم‌ترین درصد مربوط به زغال‌زیستی نخل خرما اصلاح نشده (۶/۶۹ درصد) بود. افزایش درصد هیدروژن در زغال‌های زیستی اصلاح‌شده می‌تواند عمدتاً به دلیل فرایند افزایش هیدروژن توسط پراکسید هیدروژن باشد. چراکه این افزایش در مورد درصد اکسیژن نیز اتفاق افتاد. نتایج بدست‌آمده با نتایج (Li et al., 2014; Zhao et al., 2018) هم‌راستا بودند.

بالاترین مقدار گوگرد مربوط به زغال‌زیستی نخل خرما اصلاح نشده (۱۸/۰۹ درصد) و پائین مقدار آن نیز مربوط به زغال‌زیستی باگاس نیشکر اصلاح‌شده (۱/۵۳۱ درصد) بود. همچنین لازم به ذکر است که اصلاح زغال‌های زیستی مقدار گوگرد را در آن‌ها کاهش داد. که این مسئله نیز به دلیل فرار بودن گوگرد و افزایش تصاعد آن با افزودن پراکسید هیدروژن می‌باشد که از مقدار آن کاسته است. در رابطه با نسبت O/C بیش‌ترین مقدار مربوط به زغال‌زیستی باگاس نیشکر اصلاح‌شده (۰/۶۴۸) و کم‌ترین مقدار نیز مربوط به زغال‌زیستی نخل خرما اصلاح نشده (۰/۲۵۷) بود. اصلاح زغال‌های زیستی با پراکسید هیدروژن مقدار این شاخص را افزایش داد. که این دلیل این موضوع افزایش مقدار هیدروژن در اثر کاربرد پراکسید هیدروژن و البته

کاهش مقدار کربن آن‌هاست. از آنجا که جهت تولید زغال‌زیستی پایدار، ماده‌ی حمل‌کننده‌ی مواد غذایی باید آبریز باشد کوچک بودن نسبت O/C شاخصی از آبریزی زغال‌زیستی است. بنابراین اصلاح زغال‌زیستی با پراکسید هیدروژن از طریق افزایش درصد اکسیژن و کاهش درصد کربن می‌تواند عدد این شاخص را افزایش دهد. سطح زغال‌های زیستی اصلاح‌شده با پراکسید هیدروژن دارای آبریزی کم‌تری هستند (بعبارتی آب دوستی بالاتری دارند). علت عمده‌ی این آبریزی پائین (آبدوستی) به دلیل افزایش قابل توجهی از محتوای اکسیژن در این زغال‌های زیستی با اصلاح پراکسید هیدروژن است. افزایش مقدار قابل توجهی از محتوای اکسیژن در اصلاح اسیدی منجر به افزایش گروه‌های عاملی اسیدی و اکسیژن‌دار و کاهش خاصیت بازی زغال‌زیستی می‌گردد (شکل ۲-الف تا د) (Li et al., 2011; Yuan et al., 2010; Spokas et al., 2014) (این مسئله می‌تواند افزایش ظرفیت نگهداری آب را نیز بدنبال داشته باشد). نسبت O/C کم‌تر نشان‌دهنده کاهش آب‌دوستی زغال‌های زیستی با افزایش آروماتیسیتی آن‌هاست.

(Li et al., 2014) در پژوهشی بیان نمودند که اصلاح زغال‌های زیستی توسط ترکیبات اسیدی سبب شکستن دیواره منافذ و گسترش منافذ میکرو به منافذ مزو و ماکرو می‌شود که در نتیجه‌ی آن گروه‌های عاملی مانند هیدروکسیل، کربوکسیل، کتون و سایر گروه‌های اکسیژن-دار به مقدار بیش‌تری در زغال‌زیستی اصلاح‌شده می‌گردند. افزایش قطبیت می‌تواند به جذب شیمیایی آلاینده‌های آلی و معدنی از خاک و آب آلوده منجر شود.

اصلاح زغال‌زیستی می‌تواند نسبت‌های اتمی را در جهت اهداف ما ارتقا دهد. نسبت اکسیژن-کربن یکی از مهمترین شاخصهایی است که پایداری زغال‌زیستی تولیدشده را ارزیابی می‌کند. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهند که هر چه این نسبت مقدار کم‌تری داشته باشد، پایداری زغال‌زیستی بیش‌تر می‌شود. اگر نسبت مولی کم‌تر از ۰/۲ باشد، زغال‌زیستی دارای بیش‌ترین پایداری با نیمه عمر بیش از ۱۰۰۰ سال می‌باشد. و اگر نسبت مولی بین ۰/۶-۰/۲ باشد، زغال‌زیستیدارای نیمه عمر متوسط و پایداری آن بین ۱۰۰-۱۰۰۰ سال می‌باشد. و در نهایت نسبت مولی اکسیژن-کربن اگر بیش از ۰/۶ باشد، پایداری زغال‌زیستی کم‌تر از ۱۰۰ سال خواهد بود (Spokas et al., 2017). این

مسئله با توجه به اهداف کاربرد زغال زیستی در خاک باید مدیریت شود.

نتایج مقایسات میانگین (جدول ۵) نشان داد که بالاترین مقدار نسبت C/N مربوط به زغال زیستی نخل اصلاح شده (۴۰/۲۴) و کمترین مقدار نیز مربوط به زغال زیستی باگاس نیشکر اصلاح نشده (۲۳/۶۴۷ درصد) بود. اصلاح زغال‌های زیستی با پراکسید هیدروژن این شاخص را کاهش داده است؛ که احتمالاً این موضوع به دلیل کاهش مقدار نیتروژن در تیمارهای اصلاحی می‌باشد. در پارامتر H/C بالاترین مقدار مربوط به تیمار زغال زیستی باگاس نیشکر اصلاح شده (۰/۲۲۸) و کمترین آن نیز مربوط به تیمار زغال زیستی باگاس نخل خرما اصلاح نشده (۰/۱۳۳) بود. در رابطه با شاخص H/C این موضوع مشاهده شد که اصلاح سبب افزایش آن شده است. که این مسئله به دلیل افزایش اکسیژن و هیدروژن در اثر افزودن پراکسید هیدروژن به زغال‌های زیست‌یست. افزایش نسبت H/C پس از اصلاح زغال زیستی به دلیل افزایش ترکیبات آلیفاتیک می‌باشد (Ahmad et al., 2016). اصلاح زغال زیستی توسط پراکسید هیدروژن سبب افزایش محتوای اکسیژن می‌شود که به دنبال آن نسبت‌های H/C و O/C افزایش می‌یابند. افزایش این نسبت‌ها نشان‌دهنده کاهش آبگریزی و به عبارت بهتر افزایش آبدوستی و ظرفیت نگهداشت آب در آن‌هاست (Vithange et al., 2015). زغال زیستی باگاس نیشکر اصلاح شده نسبت به زغال زیستی اصلاح شده نخل خرما آروماتیسته‌ی (H/C) بالاتری داشت. که نشان‌دهنده نقش بیش‌تر ساختارهای آروماتیک در ایجاد منافذ و سطح ویژه در آن‌هاست (Jung et al., 2013). نسبت عنصری H/C با پایداری طولانی مدت زغال زیستی در محیط مرتبط است (Smith & Noack., 2000).

لازم به ذکر است که غلظت کل عناصر در زغال‌های زیستی بررسی شده است. در رابطه با غلظت عناصر فسفر، کلسیم، منیزیم، سدیم، آهن، پتاسیم و روی بالاترین مقدار مربوط به تیمار زغال زیستی باگاس نیشکر اصلاح نشده به ترتیب با مقادیر ۳۷۰/۶۶، ۱۵۲۹/۳۹، ۳۵۱/۶۶، ۲۸۹/۶۶، ۱۲۵۱/۳۳، ۱۲۵۱/۳۳ و ۴۳/۰ میلی گرم در کیلوگرم بود. کمترین مقدار این پارامترها نیز مربوط به زغال زیستی نخل اصلاح شده به ترتیب با ۸۳/۶۶، ۸۵۶/۰۰، ۱۲۸/۰۰، ۶۷/۶۶، ۶۲۱/۰۰، ۸۸۴/۳۳ و ۲۲/۳۳۳ میلی گرم در کیلوگرم بدست آمد. در کل اصلاح زغال‌های زیستی با

پراکسید هیدروژن مقدار (کل) این پارامترها را نسبت به تیمارهای اولیه کاهش داد که این نشان دهنده خاصیت اکسندگی (و تجزیه‌کنندگی) پراکسید هیدروژن می‌باشد. البته لازم به ذکر است که این مقدار گزارش شده مربوط به مقدار کل عناصر می‌باشد. و اصلاح زغال زیستی توسط پراکسید هیدروژن می‌تواند عناصر را از فاز آلی آزاد و وارد فاز معدنی و قابل دسترس نماید. مقدار تفاوت این عناصر در زغال زیستی اصلاح شده و اصلاح نشده چندان زیاد نبود (Sum et al., 2019) نیز گزارش کردند که اصلاح زغال زیستی با پراکسید هیدروژن سبب بهبود ویژگی‌های زغال زیستی از قبیل نسبت‌های عنصری و عناصر در دسترس شده است.

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که اصلاح تیمارها سبب افزایش مقدار سطح ویژه، ظرفیت تبادل کاتیونی و ظرفیت نگهداشت آب شده است؛ به طوری که بالاترین مقادیر این پارامترها در زغال زیستی باگاس نیشکر اصلاح شده (سطح ویژه ۱۶۴/۴۰ متر مربع بر گرم، ظرفیت تبادل کاتیونی ۷۸/۰۳ سانتی مول بر کیلوگرم و ظرفیت نگهداشت آب ۱/۸۱۳ گرم بر گرم) به دست آمد (جدول ۶). کمترین مقادیر نیز مربوط به زغال زیستی نخل خرما (سطح ویژه ۸۹/۷۳ متر مربع بر گرم، ظرفیت تبادل کاتیونی ۴۵/۸۰ سانتی مول بر کیلوگرم و ظرفیت نگهداشت آب ۱/۱۱۸۰ گرم بر گرم) بود. افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی ناشی از افزایش گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن توسط اصلاح با پراکسید هیدروژن می‌باشد. همچنین، حداقل در بخشی، به دلیل افزایش مقدار خلل و فرج و ایجاد مکان‌های جدید جذب در تیمارهای اصلاحی توسط ماده‌ی اصلاحی پراکسید هیدروژن می‌باشد. که سبب افزایش و بهبود مقدار این پارامترهای فیزیکی در زغال‌های زیستی اصلاحی مورد مطالعه باشد. علاوه بر این لازم به ذکر است که اصلاح زغال زیستی منجر به کاهش pH و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی تیمارها گردید. گزارشهای (Kameyama et al., 2012) و (Al-wabel et al., 2013) در این خصوص مؤید روند فوق می‌باشد.

ظرفیت نگهداری آب یکی دیگر از ویژگی‌های فیزیکی زغال زیستی می‌باشد. که به مقدار تخلخل و بهم پیوستگی منافذ آن بستگی دارد. پژوهش‌های متعدد نشان دادند که زغال زیستی تولید شده در دمای بالا و اصلاح شده می‌تواند آب بیش‌تری را در منافذ خود نگهداری کند (Gray et al.,

(2014). اصلاح زغال‌زیستی با توجه به اهداف کاربردی آن، می‌تواند ظرفیت نگهداری آب را در راستای اهداف مورد نظر، بهبود بخشیده و ارتقا دهد. زغال‌زیستی به دلیل دارا بودن بار الکتریکی منفی در سطح آن توانایی بالایی در جذب و تبادل عناصر کاتیونی مورد نیاز رشد گیاهان و ریزجانداران دارد، که از نظر حاصلخیزی خاک و اصلاح آلودگی آن حائز اهمیت است. این توانایی در زغال‌زیستی ناشی از سطح ویژه بالا و گروه‌های عاملی موجود در سطح نظیر کربوکسیل که عمدتاً دارای بار الکتریکی منفی می‌باشند، می‌شود (Liang et al., 2008). اصلاح زغال‌زیستی با پراکسید هیدروژن سبب افزایش این گروه‌های عاملی و در نتیجه افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی زغال‌های زیستی اصلاحی شده که یک بهبود کیفیت در زغال‌زیستی به شمار می‌آید. در رابطه با چگالی ظاهری نیز مشاهده شد که اصلاح تیمارها سبب کاهش مقدار چگالی ظاهری شده است. به‌طوری که بالاترین چگالی ظاهری در تیمار زغال‌زیستی نخل اصلاح نشده (۰/۳۲۳ گرم بر متر مکعب) بدست آمد. و پائین‌ترین مقدار این پارامتر نیز مربوط به تیمار زغال‌زیستی باگاس نیشکر (۰/۱۱۴ گرم بر متر مکعب) بود. چگالی زغال‌زیستی تولیدشده بستگی به زیست‌توده‌ی اولیه دارد. و هرچه چگالی زیست‌توده اولیه بیشتر باشد، آن پارامتر در زغال‌زیستی نیز بیش‌تر خواهد بود. اصلاح توسط پراکسید هیدروژن منجر به بیش‌تر شدن تجزیه‌ی ترکیبات گیاهی مانند همی سلولز و آزادسازی این مواد تبدیل آن‌ها از فاز آلی به فاز معدنی می‌شود. این فرایند باعث ایجاد منافذی در درون بافت‌های باقی‌مانده شده که خروج این مواد منجر به افزایش غلظت آن‌ها می‌شوند. و افزایش تخلخل در ادامه، کاهش چگالی ظاهری را به دنبال خواهد داشت. گزارش‌های (Chen et al., 2008؛ Li et al., 2014؛ Tan et al., 2018) با نتایج بدست‌آمده در فوق، هم‌راستا بود. سطح ویژه (جدول ۶) نشان می‌دهد که زغال‌زیستی باگاس نیشکر اصلاح نشده بالاترین مقدار و زغال‌زیستی نخل اصلاح‌شده کم‌ترین مقدار را دارا بود. نتایج به خوبی با مشاهدات مربوط به تغییرات سطح ویژه مطابقت داشتند، زیرا اصلاح زغال‌های زیستی توسط پراکسید هیدروژن سبب اکسیده کردن سطح زغال‌های زیستی و در نتیجه کاهش سطح ویژه می‌شود. علاوه بر آن، افزوده شدن گروه‌های عاملی خود قسمتی از سطوح را اشغال نموده و سبب کاهش آن می‌گردد.

نتایج مقایسات میانگین (جدول ۷) نشان داد که بالاترین مقدار درصد مواد فرار مربوط به زغال‌زیستی باگاس اصلاح نشده (۳۰/۳۰۳ درصد) بود. و کم‌ترین مقدار آن نیز در زغال‌زیستی نخل اصلاح‌شده (۲۲/۷۴۶ درصد) حاصل شد. اصلاح زغال‌زیستی مواد فرار را کاهش داد که این موضوع عمدتاً به علت تصاعد این مواد از ساختار زغال‌زیستی در اثر کاربرد پراکسید هیدروژن می‌باشد. در رابطه با خاکستر، بیش‌ترین مقدار آن در زغال‌زیستی باگاس اصلاح نشده (۱۳/۸۶۶ درصد) بدست آمد. کم‌ترین مقدار نیز از آن زغال‌زیستی نخل اصلاح‌شده (۸/۷۳۳ درصد) بود. در کل اصلاح زغال‌زیستی مقدار خاکستر را در تیمارهای اصلاح‌شده نسبت به تیمارهای اولیه کاهش داد. اصلاح زغال‌زیستی سبب کاهش مقدار خاکستر در زغال‌های زیستی نسبت به تیمارهای اولیه شده است. که می‌تواند نکته‌ی مثبت در تولید زغال‌های زیست‌یست. این رویداد به دلیل تجزیه این خاکسترها توسط پراکسید هیدروژن می‌باشد تجزیه و تحلیل عنصری نشان داد که هیچ افزایش و کاهش کلی در ترکیب عنصری نمونه‌های زغال‌زیستی از طریق اصلاح با پراکسید هیدروژن وجود نداشته و تنها کاهش به نسبت اندکی در عناصر پس از اصلاح ایجاد شده است. که نشان می‌دهد ویژگی عمده زغال‌زیستی در طول دوره اصلاح و انکبسیون بدون تغییر باقی می‌ماند (Huff et al., 2016). این روند در پارامتر EC نیز قابل مشاهده بود. به‌طوری که اصلاح سبب کاهش آن در مقایسه با تیمارهای اولیه گردید. که بیانگر همبستگی مثبت این پارامترها با یکدیگر می‌باشد. این نتایج با گزارشات (Xue et al., 2012) ، (Khajavi et al., 2021) ، (Usman et al., 2016) و (Takaya et al., 2016) مشابه بود. این مسئله در نهایت بر روی غلظت کل عناصر نیز تأثیرگذار بوده و سبب کاهش آن‌ها شد. ولی احتمال افزایش مقادیر معدنی عناصر و دسترسی آن‌ها را خواهد داشت. بالاترین مقدار EC مربوط به تیمار زغال‌زیستی باگاس اصلاح نشده (۹/۵۵ دسی زیمنس بر متر) و کم‌ترین آن نیز مربوط به زغال‌زیستی نخل اصلاح‌شده (۷/۱۳ دسی زیمنس بر متر) بدست آمد. این امر به احتمال بالا به دلیل تجزیه خاکستر می‌باشد. در رابطه با بیکرنات بیش‌ترین مقدار مربوط به زغال‌زیستی باگاس اصلاح نشده بود؛ که (۱۶/۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم) حاصل شد. پائین‌ترین مقدار نیز در تیمار زغال‌زیستی نخل اصلاح‌شده (۵/۹۶ میلی گرم بر کیلوگرم) بدست آمد. اصلاح

زغال‌زیستی سبب کاهش این عنصر نسبت به زغال‌های زیستی اولیه شده است. که این امر به دلیل کاهش خاکستر زغال‌های زیستی است. که در نهایت سبب کاهش غلظت کل آن شده است. در رابطه با سولفات بیش‌ترین مقدار مربوط به تیمار زغال‌زیستی نخل اصلاح‌شده (۱۶۵/۶۶ میلی گرم بر کیلوگرم) بدست آمد. و پائین‌ترین مقدار نیز در تیمار زغال‌زیستی باگاس نیشکر اصلاح‌شده (۱۲۸/۳۳ درصد) مشاهده گردید. اصلاح سبب کاهش مقدار این عنصر شد. که این مسئله نیز به احتمال فراوان به دلیل افزایش تجزیه خاکستر و احتمالاً تصاعد این عنصر می‌باشد. در رابطه با عنصر کلر نیز نتیجه‌ی مشابهی به دست آمد به‌طوری که اصلاح زغال‌های زیستی سبب کاهش مقدار آن در تیمارهای اصلاحی نسبت به تیمارهای اولیه گردید. بالاترین مقدار کلر در تیمار زغال‌زیستی باگاس نیشکر اصلاح نشده (۴۴/۰۰ میلی گرم در کیلوگرم) و کم‌ترین آن نیز در تیمار زغال‌زیستی نخل اصلاح‌شده (۲۶/۳۳ میلی گرم در کیلوگرم) بدست آمد. که فرار بودن عنصر کلر دلیل کاهش آن می‌باشد. اصلاح زغال‌زیستی سبب افزایش درصد رطوبت در تیمارهای اصلاحی نسبت به تیمارهای اولیه (اصلاح نشده) شد. به‌طوری که بالاترین درصد رطوبت در تیمار زغال‌زیستی نیشکر اصلاح‌شده (۲۴/۲۵ درصد) حاصل شد. حال آنکه کم‌ترین مقدار رطوبت در تیمار زغال‌زیستی نخل اصلاح نشده (۱۱/۲۷۶ درصد) مشاهده شد. این مسئله به به دلیل افزایش مقدار اکسیژن و هیدروژن به تیمارها در اثر اصلاح با پراکسید هیدروژن و تشکیل آب و رطوبت در تیمارهای اصلاحی می‌باشد. اصلاح تیمارها با پراکسید هیدروژن سبب کاهش مقدار کربن تثبیت‌شده در تیمارهای اصلاح‌شده نسبت به تیمارهای اولیه شده است. به‌طوری که بالاترین مقدار کربن تثبیت‌شده مربوط به تیمار زغال‌زیستی نخل اصلاح نشده (۴۹/۷۸۵ درصد) و پائین‌ترین درصد نیز مربوط به تیمار زغال‌زیستی باگاس اصلاح‌شده (۳۸/۸۶۱ درصد) بود. نتایج بدست آمده با نتایج (Xue et al., 2012) تقریباً مشابه بود. نتایج مطالعات نشان داده است که اصلاح زغال‌های زیستی با اسید می‌تواند سبب تجزیه مواد لیگنوسلولزی، آلیفاتیک و آروماتیک آن‌ها شود

(Fierro et al., 2010). بنابراین، با تجزیه‌ی این مواد، بخش باقی‌مانده کربن پایدار در ساختار زغال‌های زیستی اصلاح‌شده نسبت به زغال‌زیستی اولیه کاهش می‌یابد. (Zhao et al., 2012) و (Sun et al., 2019) در گزارشات خود، نتایج مشابهی را با یافته‌های پژوهش حاضر بیان نمودند. در آخر لازم به ذکر است که زغال‌های زیستی دارای غلظت کادمیوم، نیکل و سرب قابل قرائت توسط دستگاه نبود. و این فاکتورها گزارش نگردید.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج بدست‌آمده نشان داد که اصلاح زغال‌زیستی توسط پراکسید هیدروژن سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی مورد بررسی شده است. اصلاح زغال‌زیستی سبب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، ظرفیت نگهداشت آب، گروه‌های عاملی (دارای اکسیژن)، درصد رطوبت، درصد اکسیژن، درصد هیدروژن، کاهش سطح ویژه، غلظت کل عناصر غذایی، درصد نیتروژن، درصد گوگرد، درصد خاکستر، مقدار pH، EC، درصد پایداری کربن (کربن تثبیت‌شده)، مواد فرار و درصد کربن و افزایش نسبت‌های اتمی مورد بررسی (اکسیژن به کربن، نیتروژن به کربن در تیمار زغال‌زیستی نخل خرما و هیدروژن به کربن) گردید. کاهش چگالی ظاهری در تمام تیمارها و نسبت عنصری نیتروژن به کربن در تیمار زغال‌زیستی باگاس نیشکر را به دنبال داشت. بهترین نتایج عمدتاً مربوط به زغال‌زیستی باگاس نیشکر اصلاح‌شده بود. که به‌عنوان بهترین تیمار معرفی می‌شود. با توجه به نتایج بدست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که اصلاح زغال‌زیستی با پراکسید هیدروژن می‌تواند سبب بهبود کیفیت زغال‌زیستی شده و تأثیر بهتری را بر فرآورده‌های موجود در محیط‌زیست و کشاورزی و همچنین خاک و بحث مدیریت آلودگی زیست‌محیطی داشته باشد. در مقایسه با مواد دیگر زغال‌زیستی به دلیل مقرون‌به‌صرفه بودن، سازگاری با محیط‌زیست و خواص عالی، یک محصول امیدوارکننده جهت بهبود کیفیت خاک می‌باشد.

Reference

- Agrafioti E., Kalderis D., and Diamadopoulos E. 2014. Ca and Fe modified biochars as adsorbents of arsenic and chromium in aqueous solutions. *Journal of Environmental Management*, 146: 444- 450. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.029>.
- Ahmad, M., Lee, S. S., Dou, X., Mohan, D., Sung, J. K., Yang, J. E. and Ok, Y. S. 2012. Effects of pyrolysis temperature on soybean stover-and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water. *Bioresource technology*, 118: 536-544. doi: 10.1016/j.biortech.2012.05.042.
- Ahmed M.B., Zhou J.L., Ngo H.H., Guo W., and Chen, M. 2016. Progress in the preparation and application of modified biochar for improved contaminant removal from water and wastewater. *Bioresource Technology*, 214: 836-851. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.057>.
- Al-Wabel, M. I., Al-Omran, A., El-Naggar, A. H., Nadeem, M. and Usman, A. R. 2013. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes. *Bioresource Technology*, 131: 374-379. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.165>.
- Beheshti, M. and Alikhani, H. A. 2015. Changes in the quality of biochar produced from wheat straw and stubble during the slow pyrolysis process at different temperatures. *Agricultural knowledge and sustainable production*, 26 (2): 189-201.
- Bushra, B. and Remya, N. 2024. Biochar from pyrolysis of rice husk biomass—characteristics, modification and environmental application. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(5): 5759-5770.
- Cantrell, K. B., Hunt, P. G., Uchimiya, M., Novak, J. M. and Ro, K. S. 2012. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource Technology*, 107: 419-428. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.084>.
- Chan, K. Y. and Xu, Z. 2012. Biochar: nutrient properties and their enhancement. In *Biochar for environmental management* (pp. 99-116). *Routledge*. ISBN: 978-1-84407-658-1.
- Chen, B., Zhou, D. and Zhu, L. 2008. Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures. *Environmental science and Technology*, 42(14): 5137-5143. <https://doi.org/10.1021/es8002684>.
- Chen, T., Luo, L., Deng, S., Shi, G., Zhang, S., Zhang, Y., Deng, O., Wang, L., Zhang, J. and Wei, L. 2018. Sorption of tetracycline on H3PO4 modified biochar derived from rice straw and swine manure. *Bioresource technology*, 267: 431-437. doi: 10.1016/j.biortech.2018.07.074.
- Chintala, R., Mollinedo, J., Schumacher, T.E., Papiernik, S.K., Malo, D.D., Clay, D.E., Kumar, S. and Gulbrandson, D.W. 2013. Nitrate sorption and desorption in biochars from fast pyrolysis. *Microporous and Mesoporous Materials*, 179: 250-257. doi:10.1016/j.micromeso.2013.05.023.
- Dong, H., Zhang, C., Hou, K., Cheng, Y., Deng, J., Jiang, Z., Tang, L. and Zeng, G. 2017. Removal of trichloroethylene by biochar supported nanoscale zero-valent iron in aqueous solution. *Separation and Purification Technology*, 188: 188-196. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.07.033>.
- El-Naggar A., Lee S.S., Rinklebe J., Farooq M., Song H., Sarmah A.K., immerman A.R., Ahmad M., Shaheen S.M. and Ok Y.S. 2019. Biochar application to low fertility soils: a review of current status, and future prospects. *Geoderma*, 337: 536-554. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.044>.
- Environmental Protection Organization, 2017.
- Fan, S., Tang, J., Wang, Y., Li, H., Zhang, H., Tang, J., Wang, Z. and Li, X. 2016. Biochar prepared from co-pyrolysis of municipal sewage sludge and tea waste for the adsorption of methylene blue from aqueous solutions: Kinetics, isotherm, thermodynamic and mechanism. *Journal of Molecular Liquids*, 220: 432-441. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.04.107>.
- Fierro V., Muñoz G., Basta A.H., El-Saied H. and Celzard A. 2010. Rice straw as precursor of activated carbons: Activation with ortho-phosphoric acid. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1-3): 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.062>.
- Gan, C., Liu, Y., Tan, X., Wang, S., Zeng, G., Zheng, B., Li, T., Jiang, Z. and Liu, W. 2015. Effect of porous zinc–biochar nanocomposites on Cr(vi) adsorption from aqueous solution. *RSC Advances*, 5 (44): 35107–35115. <https://doi.org/10.1039/C5RA04416B>.
- Ghezzehei T.A., Sarkhot D.V., and Berhe A.A. 2014. Biochar can be used to capture essential nutrients from dairy wastewater and improve soil physico-chemical properties. *Solid Earth*, 5(2): 953-962. <https://doi.org/10.5194/se-5-953-2014>.

- Goldstein, J.I., Newbury, D.E., Michael, J.R., Ritchie, N.W., Scott, J.H.J. and Joy, D.C., 2017. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. *springer*. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4939-6676-9>.
- Gray, M., Johnson, M. G., Dragila, M. I. and Kleber, M. 2014. Water uptake in biochars: The roles of porosity and hydrophobicity. *Biomass and Bioenergy*, 61: 196-205. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.12.010>.
- Huff, M.D. and Lee, J.W. 2016. Biochar-surface oxygenation with hydrogen peroxide. *Journal of environmental management*, 165: 17-21. <https://doi: 10.1016/j.jenvman.2015.08.046>.
- Ippolito, J.A., Spokas, K.A., Novak, J.M., Lentz, R.D. and Cantrell, K.B. 2015. Biochar elemental composition and factors influencing nutrient retention. removal of phosphate and nitrate from aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal*, 210: 26-32. <https://doi: 10.1016/j.jenvman.2015.08.046>.
- Jung C., Heo J., Han J., Her N., Lee S.J., Oh J., Ryu J. and Yoon Y. 2013. Hexavalent chromium removal by various adsorbents: powdered activated carbon, chitosan, and single/multi-walled carbon nanotubes. *Separation and Purification Technology*, 106: 63-71. <https://doi:10.1016/j.seppur.2012.12.028>.
- Kagazchi, T. and Maddi Yeganeh, M. 2004. Investigating the effect of the type of raw material on the properties of activated carbon. *The 9th National Congress of Chemical Engineering of Iran*. Iran University of Science and Technology, December 3-5, 2013.
- Kameyama, K., Miyamoto, T., Shiono, T. and Shinogi, Y. 2012. Influence of sugarcane bagasse-derived biochar application on nitrate leaching in calcareous dark red soil. *Journal of Environmental Quality*, 41(4): 1131-1137. <https://doi: 10.2134/jeq2010.0453>.
- Khajavi-Shojaei, S., Moezzi, A., Norouzi Masir, M. and Taghavi, M. 2020. Characteristics of conocarpus wastes and common reed biochars as a predictor of potential environmental and agronomic applications. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-18. doi: 10.1080/15567036.2020.1783396.
- Khajavi Shojaei, Sh., Moezi, A. A., Nowrozi Masir, M. and Taqvi, M. 2021. Investigating the effect of different chemical and surface modification methods on the characteristics of biochars prepared from straw and corn residues. *Applied Soil Research*, 9 (2): 86-73.
- Kwiatkowski, M. 2008. Application of fast multivariate identification technique of adsorption systems to analyze influence of production process conditions on obtained microporous structure parameters of carbonaceous adsorbents. *Microporous Mesoporous Mater*, 115 (3): 314–331. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2008.02.002>.
- Lehmann J. and Joseph S. 2009. Biochar for environmental management- an introduction. In: Lehmann J. and Joseph S. (Eds). *Biochar for environmental management: Science and Technology*. Earthscan, London, pp: 1–11. ISBN: 978-1-84407-658-1.
- Lehmann J., and Joseph S. 2015. Biochar for environmental management: an introduction. In: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*, 2nd ed. *Earthscan from Routledge, London*, pp: 1–1214. ISBN 9780367779184. [Lehmann-Joseph/p/book/9780367779184](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.08.046).
- Li, Y., Shao, J., Wang, X., Deng, Y., Yang, H. and Chen, H. 2014. Characterization of modified biochars derived from bamboo pyrolysis and their utilization for target component (furfural) adsorption. *Energy Fuels*, 28 (8): 5119–5127. <https://doi.org/10.1021/ef500725c>.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemstad, J.O., Thies, J., Luizão, F.J., Petersen, J. and Neves, E.G. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil science society of America journal*, 70(5): 1719-1730. <https://doi:10.2136/sssaj2005.0383>.
- Liu, Z., Demisie, W. and Zhang, M. 2013. Simulated degradation of biochar and its potential environmental implications. *Environmental pollution*, 179 :146-152. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.04.030>.
- Luo, J., Li, X., Ge, C., Müller, K., Yu, H., Huang, P., Li, J., Tsang, D.C., Bolan, N.S., Rinklebe, J. and Wang, H. 2018. Sorption of norfloxacin, sulfamerazine and oxytetracycline by KOH-modified biochar under single and ternary systems. *Bioresource Technology*, 263: 385-392. <https://doi: 10.1016/j.biortech.2018.05.022>.

- Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A. R., and Lehmann, J. 2012. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils*, 48(3): 271-284. <http://dx.doi.org/10.1007/s00374-011-0624-7>.
- Shaaban, A., Se, S.M., Mitan, N.M.M. and Dimin, M.F. 2013. Characterization of biochar derived from rubber wood sawdust through slow pyrolysis on surface porosities and functional groups. *Procedia Engineering*, 68: 365-371. <https://doi: 10.1016/j.proeng.2013.12.193>.
- Shen W., Li Z., and Liu Y. 2008. Surface chemical functional groups modification of porous carbon. *Recent Patents on Chemical Engineering*, 1(1): 27-40. <https://doi: 10.2174/2211334710801010027>.
- Singh, B., Camps-Arbestain, M. and Lehmann, J. (Eds.). 2017. Biochar: a guide to analytical methods. *Csiro Publishing*. ISBN 9781498765534.
- Song, W. and Guo, M. 2012. Quality variation of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 94: 138-145. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.11.018>.
- Song, X., Liu, H., Cheng, L. and Qu, Y. 2010. Surface modification of coconut-based activated carbon by liquid-phase oxidation and its effects on lead ion adsorption. *Desalination*, 255(1-3): 78-83. <https://doi: 10.1016/j.desal.2010.01.011>.
- Spokas, K. A., Koskinen, W. C., Baker, J. M. and Reicosky, D. C. 2009. Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil. *Chemosphere*, 77(4): 574-581. <https://doi: 10.1016/j.chemosphere.2009.06.053>.
- Suárez-Hernández, L. and Barrera-Zapata, R. 2017. Morphological and physicochemical characterization of biochar produced by gasification of selected forestry species. *Revista Facultad de Ingeniería*, 26(46): 123-130. <https://doi.org/10.19053/01211129.v26.n46.2017.7324>.
- Sun, C., Chen, T., Huang, Q., Wang, J., Lu, S. and Yan, J. 2019. Enhanced adsorption for Pb (II) and Cd (II) of magnetic rice husk biochar by KMnO₄ modification. *Environmental Science and Pollution Research*, 26: 8902-8913. <https://doi: 10.1007/s11356-019-04321-z>.
- Takaya, C.A., Fletcher, L.A., Singh, S., Okwuosa, U.C. and Ross, A.B. 2016. Recovery of phosphate with chemically modified biochars. *Journal of environmental chemical engineering*, 4(1): 1156-1165. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.01.011>.
- Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y. and Yang, Z. 2015. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere*, 125: 70-85. <https://doi: 10.1007/s10163-017-0666-5>.
- Tomczyk, A. and Szezwczuk-Karpisz, K. 2022. Effect of biochar modification by vitamin c, hydrogen peroxide or silver nanoparticles on its physicochemistry and tetracycline removal. *Materials*, 15(15), p.5379. <https://doi: 10.3390/ma15155379>.
- Uchimiya, M., Chang, S., Klasson, K.T. 2011. Screening biochars for heavy metal retention in soil: role of oxygen functional groups. *Journal of Hazardous Materials*, 190: 432-441. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.063>.
- Usman, A.R., Ahmad, M., El-Mahrouky, M., Al-Omran, A., Ok, Y.S., Sallam, A.S., El- Naggar, A.H. and AlWabel, M.I. 2015. Chemically modified biochar produced from conocarpus waste increases NO₃ removal from aqueous solutions. *Environmental Geochemistry and Health*, 38 (2): 511-521. <https://doi: 10.1007/s10653-015-9736-6>.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K. and Vassileva, C. G. 2010. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5): 913-933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>.
- Wang, Z., Zheng, H., Luo, Y., Deng, X., Herbert, S. and Xing, B. 2013. Characterization and influence of biochars on nitrous oxide emission from agricultural soil. *Environmental pollution*, 174: 289-296. <https://doi: 10.1016/j.envpol.2012.12.003>.
- Weber, K. and Quicker, P. 2018. Properties of biochar. *Fuel*, 217: 240-261. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054>.
- Xue, Y., Gao, B., Yao, Y., Inyang, M., Zhang, M., Zimmerman, A.R. and Ro, K.S. 2012. Hydrogen peroxide modification enhances the ability of biochar (hydrochar) produced from hydrothermal carbonization of peanut hull to remove aqueous heavy metals: batch and column tests. *Chemical Engineering Journal*, 200: 673-680. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.06.116>.
- Xue, Y., Gao, B., Yao, Y., Inyang, M., Zhang, M., Zimmerman, A.R. and Ro, K.S. 2012. Hydrogen peroxide modification enhances the ability of biochar (hydrochar) produced from hydrothermal

- carbonization of peanut hull to remove aqueous heavy metals: batch and column tests. *Chemical Engineering Journal*, 200: 673-680. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.06.116>.
- Yu H., Zou W., Chen J., Chen H., Yu Z., Huang J., Tang H., Wei X., and Gao B. 2019. Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review. *Journal of Environmental Management*, 232: 8-21. doi: <https://doi:10.1016/j.jenvman.2018.10.117>.
- Yuan, J. H. and Xu, R. K. 2011. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. *Soil Use and Management*, 27(1): 110-115. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60186-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60186-0).
- Zafeer, M. K., Menezes, R. A., Venkatachalam, H. and Bhat, K. S. 2024. Sugarcane bagasse-based biochar and its potential applications: a review. *Emergent Materials*, 7(1), 133-161.
- Zhang Y., Li Z., and Mahmood I.B. 2014. Recovery of NH_4^+ by corn cob produced biochars and its potential application as soil conditioner. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 8(6): 825-834. <https://doi: 10.1007/s11783-014-0682-9>.
- Zhang, M.M., Liu, Y.G., Li, T.T., Xu, W.H., Zheng, B.H., Tan, X.F., Wang, H., Guo, Y.M., Guo, F.Y. and Wang, S.F. 2015. Chitosan modification of magnetic biochar produced from *Eichhornia crassipes* for enhanced sorption of Cr (vi) from aqueous solution. *RSC Advances*. 5 (58): 46955–46964. <https://doi.org/10.1039/C5RA02388B>.
- Zhao, B., O'Connor, D., Zhang, J., Peng, T., Shen, Z., Tsang, D. C. and Hou, D. 2018. Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar. *Journal of cleaner production*, 174: 977-987. <https://doi:10.1016/j.jclepro.2017.11>.